

Inhaltsverzeichnis

I Grundlagen	1
1 Anwendungen und Werkzeuge	3
1.1 Digitale Bildverarbeitung für Wissenschaft und Technik . . .	3
1.2 Beispiele wissenschaftlicher Anwendungen	4
1.2.1 Zählen und Messen von Partikeln	4
1.2.2 Austausch zwischen Atmosphäre und Ozean	7
1.2.3 Optische Oberflächenprofilvermessung	9
1.3 Hierarchie von Bildverarbeitungsoperationen	11
1.4 Bildverarbeitung und Computergrafik	15
1.5 Menschliches und maschinelles Sehen	16
1.6 Komponenten eines Bildverarbeitungssystems	19
1.6.1 Bildsensoren	19
1.6.2 Bildspeicher und Bilddarstellung	22
1.6.3 Computer-Hardware für die Bildverarbeitung	23
1.6.4 Software und Algorithmen	26
2 Bildrepräsentation	29
2.1 Einleitung	29
2.2 Digitale Bilder im Ortsraum	29
2.2.1 Pixel und Voxel	29
2.2.2 Nachbarschaftsrelationen	33
2.2.3 Diskrete Geometrie	34
2.2.4 Quantisierung	37
2.2.5 Vorzeichenbehaftete Repräsentation von Bildern	38
2.2.6 Helligkeitsempfinden des menschlichen Sehsystems	39
2.3 Wellenzahlraum und Fouriertransformation	41
2.3.1 Vektorräume	41
2.3.2 Diskrete eindimensionale Fouriertransformation	43
2.3.3 Zweidimensionale DFT	46
2.3.4 Wichtige Fouriertransformationspaare	48
2.3.5 Periodizität	48

2.3.6	Symmetrie	51
2.3.7	Dynamischer Bereich der DFT	53
2.3.8	Phase und Amplitude	55
2.4	Diskrete unitäre Transformationen	57
2.4.1	Allgemeine Eigenschaften	57
2.4.2	Kosinus- und Sinustransformation	60
2.4.3	Hadamardtransformation	61
2.4.4	Haartransformation	62
2.5	Schnelle Berechnung unitärer Transformationen	63
2.5.1	Zur Bedeutung schneller Algorithmen	63
2.5.2	Der 1D-Radix-2-FFT-Algorithmus	64
2.5.3	Radix-4-FFT-Algorithmus	71
2.5.4	Radix-2-Decimation-in-Frequency-FFT	72
2.5.5	Kriterien für effiziente Algorithmen	73
2.5.6	Mehrdimensionale FFT-Algorithmen	75
2.5.7	Transformation reeller Bilder	76
3	Statistik und Modelle	79
3.1	Einführung	79
3.2	Zufallsvariable	81
3.2.1	Wahrscheinlichkeitsdichte und Histogramm	81
3.2.2	Mittelwert und Varianz	83
3.2.3	Zentrale Momente	83
3.2.4	Normal- und Binomialverteilung	84
3.3	Korrelation und Spektren	85
3.3.1	Stochastische Prozesse	85
3.3.2	Korrelationen und Kovarianzen	86
3.3.3	Spektren und Kohärenz	88
3.3.4	Fehlerfortpflanzung	89
3.4	Modelle	91
3.4.1	Einführung	91
3.4.2	Diskrete inverse Probleme	93
3.4.3	Methode der kleinsten Quadrate	95
3.4.4	Houghtransformation	97
3.4.5	Iterative Methoden zur Lösung großer dünn besetzter Gleichungssysteme	100
3.4.6	Variationsrechnung	101
4	Nachbarschaftsoperatoren	105
4.1	Verknüpfung von Bildpunkten	105
4.2	Faltungsfiler	106
4.2.1	Definition	106

4.2.2	Punktantwort und Transferfunktion	107
4.2.3	Bemerkungen zur Berechnung	108
4.2.4	Rekursive Filter	110
4.2.5	Relaxationsfilter	112
4.2.6	Resonanzfilter	113
4.3	Rangordnungsfilter	116
4.3.1	Definition	116
4.3.2	Grundlegende Eigenschaften	117
4.4	Lineare verschiebungsinvariante Filter	117
4.4.1	Filter als Operatoren	117
4.4.2	Linearität	120
4.4.3	Verschiebungsinvarianz	121
4.4.4	Faltung, Linearität und Verschiebungsinvarianz	121
4.4.5	Eigenfunktionen	122
4.4.6	Punktantwort	124
4.4.7	Transferfunktion	127
4.4.8	Inverse Operatoren	128
5	Multiskalenrepräsentation	129
5.1	Die Bedeutung von Skalen	129
5.2	Räumliche und Wellenzahldarstellung	131
5.3	Skalenraum	133
5.3.1	Erzeugung von Skalenräumen durch Diffusion	133
5.3.2	Allgemeine Eigenschaften eines Skalenraums	137
5.3.3	Quadratische und logarithmische Skalenräume	139
5.3.4	Differentielle Skalenräume	140
5.3.5	Diskrete Skalenräume	141
5.4	Mehrgitterrepräsentation	143
5.4.1	Einführung	143
5.4.2	Gaußpyramide	143
5.4.3	Laplacepyramide	145
II	Bildaufnahme und Vorverarbeitung	149
6	Quantitative Visualisierung	151
6.1	Einleitung	151
6.2	Elektromagnetische Wellen	153
6.2.1	Klassifikation und Nomenklatur	153
6.2.2	Dispersion und Dämpfung	153
6.2.3	Polarisation	156
6.2.4	Kohärenz	156

6.2.5	Energieflußdichte	157
6.2.6	Photonen	157
6.3	Radiometrie, Photometrie und Farbsehen	158
6.3.1	Radiometrische Begriffe	158
6.3.2	Spektroradiometrie	162
6.3.3	Spektrale Empfindlichkeit des menschlichen Auges . . .	162
6.3.4	Spektrale Abtastmethoden	164
6.3.5	Farbsehen des Menschen	167
6.4	Wechselwirkung zwischen Strahlung und Materie	171
6.4.1	Thermische Emission	171
6.4.2	Brechung, Reflexion und Transmission	176
6.4.3	Rauhe Oberflächen	179
6.4.4	Absorptionsvermögen und Transmissivität	180
6.4.5	Streuung	182
6.4.6	Optische Aktivität	184
6.4.7	Dopplereffekt	186
7	Bildaufnahme	189
7.1	Einleitung	189
7.2	Welt- und Kamerakoordinaten	190
7.2.1	Definition	190
7.2.2	Rotation	191
7.3	Zentralprojektion	193
7.3.1	Das Lochkameramodell	193
7.3.2	Projektive Abbildung	195
7.3.3	Homogene Koordinaten	196
7.3.4	Geometrische Verzerrungen	198
7.3.5	Schärfentiefe	199
7.4	Lineare Systemtheorie der Abbildung	202
7.4.1	Punktantwort	202
7.4.2	Optische Transferfunktion	205
7.4.3	Können wir dreidimensionale Objekte sehen?	208
7.5	3D-Abbildungstechniken	210
7.5.1	Stereoskopie	210
7.5.2	Schnittbildabtastung	212
7.5.3	Tomographie	213
7.5.4	Konfokale Laserabtastmikroskopie	214
7.6	Radiometrie der Abbildung	216
7.6.1	Strahlungsinvarianz	217
7.7	Beleuchtungstechniken	220
7.7.1	Gestalt aus Schattierung für Lambertsche Oberflächen .	220
7.7.2	Gestalt aus Brechung an glänzenden Oberflächen	223

7.8	Digitalisierung	227
7.8.1	Definition und Wirkung der Digitalisierung	227
7.8.2	Schritte des Abtastprozesses	229
7.8.3	Bilderzeugung	230
7.8.4	Abtastung	231
7.8.5	Das Abtasttheorem	232
7.8.6	Begrenzung auf ein endliches Fenster	234
7.8.7	Rekonstruktion aus Abtastpunkten	234
7.8.8	Standardabtastung	236
7.9	Quantisierung	237
8	Pixelverarbeitung	239
8.1	Einführung	239
8.2	Homogene Punktoperationen	240
8.2.1	Definitionen und grundlegende Eigenschaften	240
8.2.2	Lookup-Tabellen	241
8.2.3	Interaktive Grauwertauswertung	244
8.3	Inhomogene Punktoperationen	250
8.3.1	Bildmittelung	251
8.3.2	Korrektur inhomogener Beleuchtung	252
8.3.3	Radiometrische Kalibrierung	254
8.3.4	Fensterfunktionen	258
8.4	Mehrkanal-Punktoperationen	259
8.4.1	Definitionen	259
8.4.2	Dyadische Punktoperationen	260
8.5	Geometrische Transformationen	261
8.5.1	Vorwärts- und Rückwärtsabbildung	261
8.5.2	Affine Abbildung	263
8.5.3	Perspektivische Projektion	263
8.5.4	Bestimmung der Transformationskoeffizienten	264
8.6	Interpolation	266
8.6.1	Grundlagen	266
8.6.2	Interpolation im Fourierraum	268
8.6.3	Lineare Interpolation	269
8.6.4	Interpolation mit Polynomen	271
8.6.5	Interpolation mit Splines	273
8.6.6	Optimierte Interpolation	277
8.6.7	Schnelle Algorithmen für geometrische Transformationen	279

9	Restauration, Rekonstruktion	281
9.1	Einführung	281
9.2	Bildstörungen	283
9.2.1	Defokussierung und Linsenaberrationen	284
9.2.2	Bewegungsunschärfe	286
9.3	Inverse Filterung	288
9.3.1	Grundlagen	288
9.3.2	Iterative inverse Filterung	289
9.3.3	3D-Rekonstruktion durch inverse Filterung	290
9.4	Modellbasierte Restauration	292
9.4.1	Grundlagen	292
9.4.2	Rekonstruktion von Tiefenkarten aus Fokussereien	293
9.5	Grundlagen der Tomographie	296
9.5.1	Radontransformation	296
9.5.2	Fourierscheibentheorem	297
9.6	Gefilterte Rückprojektion	299
9.6.1	Grundlagen	299
9.6.2	Kontinuierlicher Fall	299
9.6.3	Diskreter Fall	301
9.7	Algebraische Rekonstruktion	303
III	Merkmalsextraktion	307
10	Mittelwerte und Kanten	309
10.1	Einleitung	309
10.2	Eigenschaften von Glättungsfiltern	311
10.2.1	Verschiebungsfreiheit	311
10.2.2	Mittelwerterhaltung	312
10.2.3	Monoton fallende Transferfunktion	312
10.2.4	Isotropie	313
10.3	Rechteckfilter	313
10.4	Binomialfilter	318
10.4.1	Filter als Netzwerke	325
10.5	Großräumige Mittelung	327
10.5.1	Mehrschrittmittelung	328
10.5.2	Mehrgittermittelung	332
10.5.3	Rekursive Mittelung	333
10.6	Nichtlineare Mittelung	337
10.6.1	Medianfilter	338
10.6.2	Gewichtete Mittelung	339
10.6.3	Steuerbare Mittelung	340

10.7	Mittelung in Mehrkanalbildern	342
10.8	Eigenschaften von Kantensfiltern	344
10.8.1	Verschiebungsfreiheit	345
10.8.2	Unterdrückung des Mittelwertes	346
10.8.3	Nichtselektive Ableitung	346
10.8.4	Symmetrie	347
10.8.5	Isotropie	348
10.9	Gradientenbasierte Kantendetektion	348
10.9.1	Gradientenvektor	348
10.9.2	Diskrete Differenzen erster Ordnung	349
10.9.3	Roberts-Kantendetektor	353
10.9.4	Sobel-Kantendetektor	354
10.9.5	Spline-basierte Kantendetektion	356
10.9.6	Optimaler Differenzenoperator	357
10.10	Kantendetektion mit dem Laplaceoperator	359
10.10.1	Laplacefilter	359
10.10.2	LoG- und DoG-Filter	360
10.11	Kanten in Mehrkanalbildern	362
11	Einfache Nachbarschaften	365
11.1	Einführung	365
11.2	Eigenschaften einfacher Nachbarschaften	367
11.2.1	Darstellung im Ortsraum	367
11.2.2	Darstellung im Fourierraum	368
11.2.3	Vektordarstellung lokaler Nachbarschaften	369
11.3	Tensordarstellung erster Ordnung	371
11.3.1	Der Strukturtensor	371
11.3.2	Klassifizierung von Eigenwerten	373
11.3.3	Trägheitstensorsmodell	375
11.3.4	Orientierungsvektor	378
11.3.5	Kohärenz	380
11.3.6	Farbkodierung des 2D-Strukturensors	380
11.3.7	Weitere äquivalente Ansätze	381
11.3.8	Implementierung	382
11.4	Lokale Wellenzahl und Phase	387
11.4.1	Phase	387
11.4.2	Hilberttransformation und analytische Signale	388
11.4.3	Quadraturfilter	393
11.4.4	Lokale Wellenzahlbestimmung	396
11.5	Tensordarstellung durch Quadraturfiltersätze	397
11.5.1	Grundlagen	397
11.5.2	Polar separierbare Quadraturfilter	398

11.5.3	Bestimmung des Orientierungsvektors	400
11.5.4	Bestimmung der lokalen Wellenzahl	403
11.5.5	Bestimmung des Strukturensors	404
12	Textur	407
12.1	Einführung	407
12.2	Rotations- und größeninvariante Texturparameter	411
12.2.1	Lokale Varianz	411
12.2.2	Höhere Momente	413
12.3	Rotations- und größenvariante Texturparameter	413
12.3.1	Lokale Orientierung	413
12.3.2	Lokale Wellenzahl	414
12.3.3	Pyramidale Texturanalyse	417
13	Bewegung	419
13.1	Einführung	419
13.2	Grundlagen	420
13.2.1	Bewegung und Grauwertveränderungen	420
13.2.2	Das Blendenproblem	423
13.2.3	Das Korrespondenzproblem	424
13.2.4	Bewegung als Orientierung im Orts/Zeit-Raum	426
13.2.5	Bewegung im Fourierraum	429
13.2.6	Optischer Fluß	430
13.3	Differentielle Methoden	438
13.3.1	Ansatz	438
13.3.2	Diskrete Methode der kleinsten Quadrate	439
13.3.3	Kontinuierliche Methode der kleinsten Quadrate	441
13.3.4	Modellierung erster Ordnung des optischen Flusses	442
13.3.5	Differentialgeometrische Modellierung	443
13.3.6	Mehrkanalbilder	447
13.3.7	Orts/Zeit-Energiemodelle	448
13.4	Tensormethode	451
13.4.1	Optimierungsstrategie	451
13.4.2	Eigenwertanalyse	453
13.5	Korrelationsmethode	457
13.5.1	Grundlagen	457
13.5.2	Schnelle iterative Maximumsuche	458
13.5.3	Bewertung und Vergleich	459
13.6	Phasenmethode	460
13.6.1	Grundlagen	460
13.6.2	Bewertung und Vergleich	461
13.6.3	Vom normalen Fluß zum 2D-Fluß	462

13.7 Fehleranalyse	463
13.7.1 Analyse statistischer Fehler	464
13.7.2 Korrektheit	466
13.7.3 Systematische Fehler durch Rauschen	470
13.7.4 Ungleichmäßige Bewegung	472
13.7.5 Bewegungsdiskontinuität	475
13.7.6 Beleuchtungsänderung	477

IV Bildanalyse 479

14 Regionen und Diskontinuitäten 481

14.1 Einleitung	481
14.2 Pixelorientierte Segmentierung	482
14.3 Regionenorientierte Verfahren	486
14.3.1 Grundlagen	486
14.3.2 Pyramid-Linking	487
14.4 Kantenbasierte Segmentierung	490
14.5 Modellbasierte Segmentierung	491
14.5.1 Einleitung	491
14.5.2 Parameterraum, Houghtransformation	491
14.5.3 Orientierungsbasierte schnelle Houghtransformation	493
14.6 Regularisierung lückenhafter Daten	494
14.6.1 Ähnlichkeitsbedingungen	496
14.6.2 Glattheitsbedingungen	497
14.6.3 Numerische Lösung	499
14.6.4 Kontrollierte Glattheit	500
14.7 Elastizitätsmodelle	503
14.8 Netzwerkmodelle	506
14.8.1 Eindimensionale Netzwerke	506
14.8.2 Verallgemeinerte Netzwerke	508
14.8.3 Diskontinuitäten in Netzwerken	509
14.8.4 Zweidimensionale Netzwerke	510
14.8.5 Mehrgitternetzwerke	510
14.9 Diffusionsmodelle	513
14.9.1 Diffusion mit Austausch	513
14.9.2 Anisotrope Diffusion	516

15 Formanalyse 519

15.1 Einleitung	519
15.2 Morphologische Operatoren	519
15.2.1 Nachbarschaftsoperationen mit Binärbildern	519

15.2.2	Allgemeine Eigenschaften	522
15.2.3	Opening und Closing	525
15.2.4	Hit-Miss-Operator	527
15.2.5	Thinning	530
15.2.6	Extraktion von Rändern; Distanztransformation	531
15.3	Repräsentation der Form	533
15.3.1	Lauf längencode	533
15.3.2	Quadrees	534
15.3.3	Kettencode	536
15.4	Einfache Formparameter	538
15.4.1	Fläche	538
15.4.2	Umfang	539
15.4.3	Rundheit	540
15.4.4	Umgebendes Rechteck	540
15.5	Momentenbasierte Formmerkmale	541
15.5.1	Definitionen	541
15.5.2	Normierte Momente	542
15.5.3	Momenten-Tensor	542
15.6	Fourierdeskriptoren	544
15.6.1	Kartesische Fourierdeskriptoren	544
15.6.2	Polare Fourierdeskriptoren	546
15.6.3	Eigenschaften der Fourierdeskriptoren	547
15.6.4	Invariante Objektbeschreibungen	548
16	Klassifizierung	553
16.1	Einleitung	553
16.2	Merkmalsraum	556
16.2.1	Pixel- und objektbasierte Klassifizierung	556
16.2.2	Cluster	557
16.2.3	Selektion von Merkmalen	557
16.2.4	Unterscheidung von Klassen im Merkmalsraum	559
16.2.5	Hauptachsentransformation	561
16.2.6	Überwachte und unüberwachte Klassifizierung	563
16.3	Klassifizierungsverfahren	564
16.3.1	Nachschaumethode	564
16.3.2	Quadermethode	565
16.3.3	Methode des geringsten Abstandes	568
16.3.4	Methode der höchsten Wahrscheinlichkeit	569
	Literaturverzeichnis	571
	Sachverzeichnis	580